

# 2kW급 양방향 LDC의 효율개선 방안

채용웅\*

## Efficiency Improvement Method of 2KW Power Bidirectional LDC

Yong-Yoong Chai\*

### 요약

본 논문에서 차량용 양방향 LDC의 효율 개선을 위한 4개의 각기 다른 다양한 방안이 모색되었다. 예를 들어 채널저항의 감소요인을 분석하여 시스템에 최적의 MOSFET을 사용하고, 트랜스포머에서의 효율감소 요인을 찾아 개선하였다. 그 결과 기 개발되었던 85% 가량의 LDC 평균효율을 94.7% 까지 개선시킬 수 있었다.

### ABSTRACT

In this thesis, various solutions through four different cases have been sought for an efficiency improvement of the bidirectional LDC for vehicles. For example, it analyzed the reduction factor of the channel resistance and applied the optimum MOSFET applied to the system, and found and improved the efficiency reduction factor of the transformer. As a result, the average efficiency of the developed LDC could be improved from 85% to 94.7%.

### 키워드

LDC, Efficiency, Core, Full Bridge, Converter, Frequency  
저전압 직류 전압 변환기, 효율, 코어, 풀브리지, 컨버터, 주파수

## I. 서론

최근에 미세먼지 저감 대책 등으로 인해 정부에서는 전기자동차에 대한 지원을 한층 강화하고 있다. 그러나 정부의 이러한 노력에도 불구하고 전기자동차가 일회 충전에 주행할 수 있는 거리의 한계로 인해 아직은 일반 대중에게 각광받지 못하고 있는 것이 현실이다[1-2]. 이러한 문제는 충전소의 확대에 의해 해소될 수도 있겠지만 전기자동차의 효율개선 없이는 근본적 문제해결이 되지 않을 것이다. 이에 본 논문에서는 기존에 개발된 자동차용 2KW급 LDC(: Low Voltage DC/DC Converter)의 효율을 개선하는 방안을 제시하고자 한다.

## II. LDC 토폴로지

그림 1은 본 논문에서 효율개선에 적용하고자 하는 양방향 풀브리지 LDC의 토폴로지를 나타낸다[3]. 상기 회로의 효율은 특정구간에서 90% 정도의 효율을 나타내고 있으나 전반적으로는 약 85% 정도의 평균 효율을 나타내고 있는 것을 알 수 있다(그림 2). 본 연구에서는 이와 같이 기개발된 LDC의 효율을 개선하는 방안에 대해 논의할 것이며, 이러한 개선 방안이 LDC 뿐만 아니라 대부분의 DC-DC변환기에도 확대 적용이 가능할 것이다[4].

\* 교신저자 : 계명대학교 전자공학전공  
• 접수일 : 2017. 07. 28  
• 수정완료일 : 2017. 08. 13  
• 게재확정일 : 2017. 10. 18

• Received : July 28, 2017, Revised : Aug 13, 2017, Accepted : Oct 18, 2017  
• Corresponding Author : Yong Yoong Chai  
Dept. of Electronic Engineering, Keimyung University  
Email : yychai@kmu.ac.kr

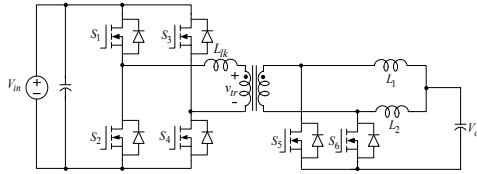


그림 1. 양방향 풀브리지 LDC의 토폴로지  
Fig. 1 Topology of full-bridge bidirectional LDC

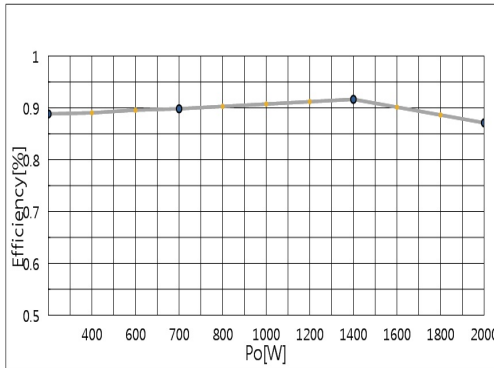


그림 2. 기존의 LDC 효율 그래프  
Fig. 2 Graph of efficiency on existing LDC

### III. LDC 효율개선

표 1은 각 소자에서 발생할 수 있는 손실분석 계산 수식을 보여주고 있다[5-7]. 손실분석은 스위칭과 트랜스포머 손실 등으로 분류 할 수 있으며 스위칭 손실은 전도, 교차 겹침(cross overlap), 커패시티브 턴온(turn-on) 손실 등으로 분류 할 수 있고 트랜스포머 손실은 구리와 코어 손실로 구분할 수 있다.

표 1의 1항은 전도손실을 나타내며 식에서  $I_{DRMS}$ 는 MOSFET이 온(on)되었을 때 드레인에 흐르는 전류에 의한 전력 손실을 나타낸다. 2항은 교차 겹침손실을 계산 하는 수식으로서  $T_i$ 는 턴온 상승시간을 나타내고  $T_f$ 는 턴오프(turn-off) 하강시간을 나타낸다. 3항은 커패시터의 턴온 손실을 계산하는 수식으로서,  $C_{OSS}$ 는 출력 커패시턴스를 나타낸다. 4항, 5항, 6항은 인덕터의 구리선, 트랜스포머의 구리선, 그리고 코어의 손실을 각각 나타낸다.

표 1. 효율손실 관련 수식  
Table 1. Equation related to efficiency loss

Item	Power Loss Equation
1 conduction	$P_{CD} = R_{DS(on)} \times I_{DRMS}^2$
2 cross-over	$P_V = \frac{\frac{1}{6} \times V_{DS} \times I_{ON} \times T_i + \frac{1}{6} \times V_{DS} \times I_{OFF} \times T_f}{T}$
3 capa. turnon	$P_C = \frac{1}{2} \times C_{OSS} \times V_i^2 \times f_s$
4 inductor(copper)	$P_{copper} = R_p \times I_{pRMS}^2 + R_s \times I_{sRMS}^2$
5 transformer(copper)	$P_{coreloss} = V_e (volume) \times core\ loss \left( \frac{W}{mm^3} \right)$
6 core	$P_{L.conduction} = R_L \times I_{RMS(L)}^2$

#### case 1. 최적의 FET선정

시제품에서는 1차측 MOSFET으로 FAIRCHILD사의 FQ140N10을 사용하였으며 2차측 MOSFET은 Microelectronics사의 STE250NS10을 사용하였다. 표 2는 상기 FET의 주요 스펙을 나타낸다[3].

표 2. 1차 및 2차측에 사용된 FET 사양  
Table 2. FET spec. using on 1st and 2nd side

	product	$V_{DSS}$	$I_{RS}$	$R_{DS(on)}$	$T_r$	$T_f$	$C_{OSS}$
1st	FQA140N10	100V	99A @100℃	0.12mΩ @100℃	940ns	360ns	1500pF @100℃
2nd	STE250NS10	100V	156A @100℃	7.2mΩ @100℃	380ns	300ns	4.3nF @100℃

상기의 FET을 사용했을 경우 반도체 스위치의 경우 라이징 타임과 폴링 타임이 커서 교차 겹침 손실이 크게 발생하였다. 뿐만 아니라  $R_{DS(on)}$ 도 커서 전도손실 역시 크게 나타났다. 이에 채널저항이 상대적으로 낮은 Infineon사의 IPB180N104를 1차와 2차에서 스위칭 MOSFET으로 사용하였다. 표 3은 교체된 스위칭소자의 사양을 보여주고 있다. 그림 3과 4는 스위칭소자 교체 전과 후의 손실분석 결과를 보여주고 있다.

표 3. IPB180N104 사양  
Table 3. IPB180N104 specification

	product	V <sub>DSS</sub>	I <sub>DS</sub>	R <sub>DS(on)</sub> N	T <sub>r</sub>	T <sub>f</sub>	C <sub>oss</sub>
1차	IPB180 N10S4	100V	134A @100℃	0.04mΩ @100℃	10ns	45ns	2460pF @100℃
2차	IPB180 N10S4	100V	134A @100℃	0.04mΩ @100℃	10ns	45ns	2460pF @100℃

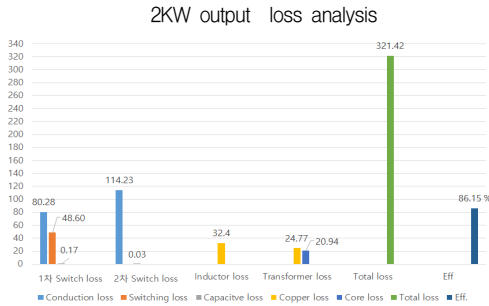


그림 3. 시제품의 손실분석 그래프  
Fig. 3 Graph of efficiency loss on prototype

case 2. 병렬구성을 통한 효율 개선

case 2는 case 1의 상황에서 1차측 MOSFET을 병렬로 구성하여 스위치에서 발생하는 전도 손실을 감소시켜 LDC의 효율을 개선하고자 했다. 1차측 MOSFET 2개를 병렬로 구성하여 총 8개의 MOSFET이 사용되었고, 결국 LDC 1차와 2차를 합쳐 총 14개의 MOSFET을 사용되었다.

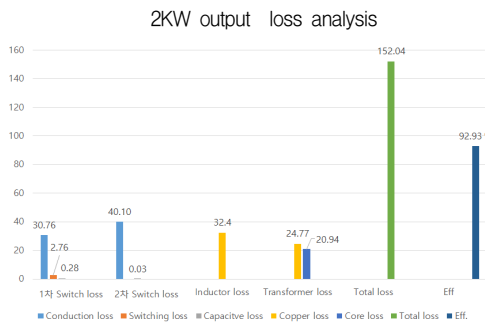


그림 4. case 10이 적용된 손실분석 그래프  
Fig. 4 Graph of efficiency loss applied by case 1

2KW output loss analysis

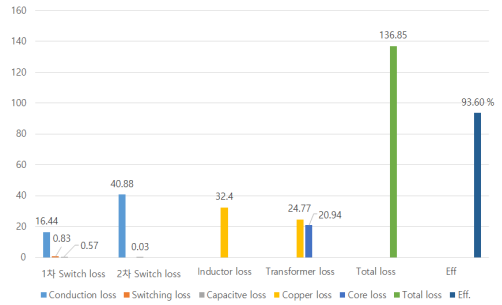


그림 5. case 2가 적용된 손실분석 그래프  
Fig. 5 Graph of efficiency loss applied by case 2

그림 5는 case 2를 적용한 후 손실분석 결과를 나타낸다. 시제품, case 1, case 2의 효율을 비교하였을 때 시제품 효율은 86.15%, case 1 효율은 92.93%, case2 효율은 93.60%로서 시제품의 효율보다 case 1와 case 2의 효율이 크게 개선되었다는 것을 알 수 있다. 그러나 case 2의 경우는 LDC의 제작비용의 상승이 예상된다. 즉 효율을 높이기 위해서는 고비용을 감수해야 할 것이다..

case 3. 주파수 변화에 따른 손실분석

case 3은 시제품에서 사용된 트랜스포머를 적용하여 스위칭 주파수를 증가시켰을 때 손실분석을 진행한 경우이다. 그림 6, 7, 8은 스위칭소자의 동작주파수를 35, 55, 75 KHz로 각각 변화시켰을 때의 손실분석 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 주파수가 상승할수록 전력손실이 감소되는 것을 알 수 있다.

따라서 주파수의 상향은 전력손실의 감소에도 기여할 뿐만 아니라 코어의 크기를 감소시키는 효과도 가져다 줄 것이다.

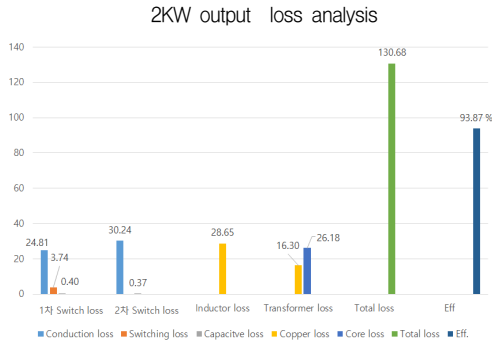


그림 6. 주파수 35kHz 일 때 손실분석 그래프  
Fig. 6 Graph of efficiency loss at 35KHz

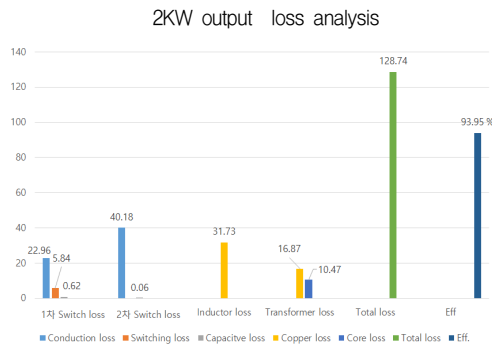


그림 7. 스위칭 주파수 55kHz 일 때 손실분석 그래프  
Fig. 7 Graph of efficiency loss at 55KHz

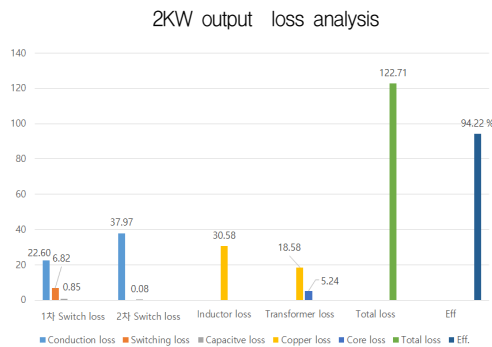


그림 8. 스위칭 주파수 75kHz 일 때 손실분석 그래프  
Fig. 8 Graph of efficiency loss at 75KHz

case 4. 최적의 트랜스포머 제작

시제품의 트랜스포머 EE7066의 경우 코어부피가 124,700mm<sup>3</sup> 이기 때문에 실제 차량에 적용하기에는 지나치게 크다. case 4 에서는 코어의 부피를 최소화 하고 효율을 최적화 시킬 수 있는 코어를 설계하기 위해 코어를 EE5555A로 교체하였다. 이러한 코어의 크기를 선정하는데 있어서 사용된 수식은 식 (1)을 사용하였다[9-10].

$$A_w \times A_c \geq 3 \times \frac{P_o}{B_{sat} \times f_s \times J} \times 10^4 [cm^4] \quad (1)$$

수식에서 AW, AC, Bsat는 코어의 window area, 단면적, saturation knee point에서의 자속밀도 값을 나타낸다. 1차측 턴 수는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

$$N_p \geq \frac{V_{peak} \times D \times 10^4}{B_r \times A_c \times f_s} \quad (2)$$

식에서 Vpeak은 변압기 일차측에 가해지는 전압의 최대값을 나타내며, D는 변압기 일차측에 가해지는 전압의 듀티를 나타낸다.

2차측 턴수는 수식 (3)을 통하여 결정한다[8].

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = nD \quad (n = \frac{N_s}{N_p}) \quad (3)$$

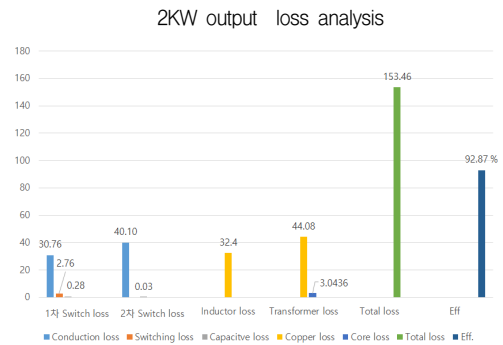


그림 9. 코어 EE5555A 사용 손실분석 그래프  
Fig. 9 Graph of efficiency loss with EE5555A

case 4를 통하여 시제품의 부피를  $87,360\text{mm}^3$  로 감소시킬 수 있었으며, 이러한 부피의 감소는 효율에도 영향을 주어 손실분석 결과가 평균 92.87%를 나타내었다.

#### IV. 시험결과

효율개선을 위한 다양한 시도(case 1~4) 이후에 나타난 효율 개선의 그래프가 그림 10에 나타나 있다. 그림에는 기존과 효율개선이 이루어지고 난 후의 LDC에서의 전력대비 효율특성이 나타나 있으며 상위의 그래프가 개선된 LDC의 효율 변화를 나타낸다. 개선된 LDC에서의 평균 효율은 94.7%로 효율 개선이 이루어지 전에 비해 약 9.7%정도의 효율 개선효과가 있는 것을 볼 수 있다.

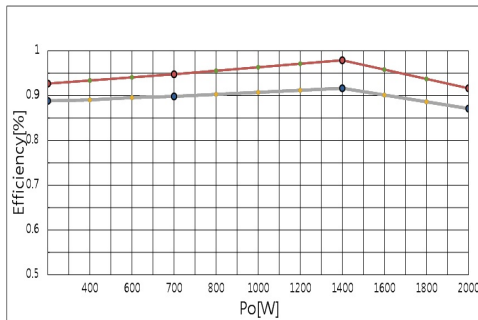


그림 10. 개선 이후의 LDC 효율

Fig. 10. Graph of efficiency on LDC after improvement

#### V. 결 론

본 논문을 통해 기존에 개발되었던 2W급 양방향 LDC의 효율개선 방안을 제시하였다. 이를 위해 최적의 파워 FET으로 스위칭 FET을 교체하고, FET의 구조를 병렬로 변경하였으며, 운용 주파수를 상향시켰으며, 최적의 코어를 찾아 트랜스를 설계하였다. 그 결과 기존의 LDC에 비해 약 8% 가량의 효율을 개선하는 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 접근은 향후 개발될 어떠한 형태의 인버터나 컨버터에도 적용이 가능할 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 2017년도 계명대학교 연구기금으로 이루어졌음.

#### References

- [1] H. Cho, "Trend of Induction Motor Technologies Applied to Eco-friendly Vehicle Traction," *Auto J.*, vol. 35, no. 10, 2013, pp. 18-20.
- [2] J. Hong, "Trend of Wound Field Synchronous Motor Development," *Auto J.*, vol. 35, no. 10, 2013, pp. 31-33.
- [3] Y. Chai and W. Do, "Development of 2KW Power Bidirectional LDC for Electrical Vehicle," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 1, Jan. 2016, pp. 65-72.
- [4] Y. Chai and W. Do, "Design of DC-DC converter controller implemented with analog memory," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 10, no. 3, Mar. 2015, pp. 357-364.
- [5] K. Billings and T. Morey, *Switchmode Power Supply Handbook*, 3<sup>rd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [6] B. Choi, *Pulsewidth Modulated DC-To-DC Power Conversion*. New York: Wiley, 2013.
- [7] S. Kwak, J. Yang, and H. Kim, "Design and Implementation of Oil Pump Control Systems Driven by a Brushless DC Electric Motor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 7, no. 4, Jan. 2014, pp. 88-90.
- [8] Y. Moon, Y. Bae, Y. Park, S. Nho, and K. Cho, "Design of 7 D.O.F Manipulator Cooperation Robot," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 5, no. 1, Feb. 2010, pp. 37-43.
- [9] Y. Chai, "Design and Implementation of PRA for a Power Supply of Electrical Vehicle," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 7, July 2016, pp. 653-658.

- [10] S. Son, Y. Park, and I. Choy, "Four-switch Three-phase inverter control method applied by simplified Space Vector PWM," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 11, no. 3, Mar. 2016, pp. 283-291.

## 저자소개



### **채용웅(Yong-Yoong Chai)**

1985년 8월 서강대학교 졸업  
(공학사)

1991년 4월 Oklahoma State  
Univ. 졸업(공학석사)

1994년 12월 Oklahoma State Univ. 졸업  
(공학박사)

계명대학교 전자공학전공 교수

※ 관심분야 : DC-DC컨버터